

МИНИБАЕВА ЛИЛИЯ РАДИКОВНА

**ГИДРОДИНАМИКА В АППАРАТАХ С МНОГОЯРУСНЫМИ
БЫСТРОХОДНЫМИ МЕШАЛКАМИ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АЗТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2011

Работа выполнена на кафедре процессов и аппаратов химической технологии Казанского государственного технологического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Клинов Александр Вячеславович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Барабаш Вадим Маркусович

доктор физико-математических наук,
профессор Мазо Александр Бенцианович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Защита состоится «4» июля 2011 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д.68, зал заседаний Ученого совета (А - 330).

Озвучив на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул.К.Маркса, 68, Казанский государственный технологический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.080.06.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Электронный вариант автореферата размещен на официальном сайте Казанского государственного технологического университета (www.kstu.ru).

Автореферат разослан «3» июня 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000678222

С.И. Поникаров

ВВЕДЕНИЕ ¹**Актуальность работы**

Аппараты с перемешивающими устройствами находят широкое применение в химической, нефтехимической, пищевой, фармацевтической и других смежных отраслях промышленности, т.к. обеспечивают высокую однородность полей концентрации и температуры во всем объеме аппарата, а также области с большими значениями скорости диссипации кинетической энергии, что способствует повышению эффективности процесса диспергирования.

Существующие полуэмпирические методы расчета аппаратов с перемешивающими устройствами качественно описывают характер распределения скоростей на основе упрощенных моделей, в которых заложено постоянство составляющих скорости по высоте аппарата, что в большинстве случаев является грубым приближением. Эти методы позволяют определять только осредненные гидродинамические характеристики потока. Однако для моделирования определяющее значение имеют локальные характеристики течения, которые невозможно получить интегральными методами расчета. Так, например, в процессе получения бутылкаучука в реакторе-полимеризаторе с шестиярусной быстроходной мешалкой зарождение полимера происходит мгновенно на расстоянии от 1 до 10 см от места ввода катализатора, в то время как диаметр аппарата равен двум метрам. При получении бутылкаучука в суспензии обязательным условием являются низкие температуры полимеризации – от минус 85°C до минус 95°C. Температура стеклования бутылкаучука минус 69°C, и при повышении температуры реакционной массы полимер переходит из застеклованного состояния в высокоэластическое, что приводит к налипанию его на элементы реактора-полимеризатора. Возможный путь решения данной проблемы видится в изменении локальной структуры потока в месте ввода катализатора.

В этой связи актуальным является разработка методики расчета аппаратов с перемешивающими устройствами на основе численного решения системы дифференциальных уравнений переноса субстанций, позволяющие получать локальные гидродинамические характеристики.

Предметом исследования являются поле скорости и гидродинамические характеристики (критерии мощности и подачи, скорость диссипации кинетической энергии) в аппаратах с различными быстроходными перемешивающими устройствами, которые выступают **объектом исследования**.

Цель работы. Разработка методики расчета поля скорости в аппаратах с быстроходными многоярусными мешалками для реконструкции перемешивающего устройства в реакторе-полимеризаторе получения БК с целью увеличения времени его пробога. Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

¹ Автор выражает благодарность к.т.н., доценту Мухаметзяновой А.се Габдулмазитовне за ценные практические советы и рекомендации в процессе выполнения данной работы.

- 1) анализ адекватности описания поля скорости в аппаратах с быстрходными перемешивающими устройствами на основе различных моделей турбулентности;
- 2) исследование влияния конструкции перемешивающего устройства на поле скорости и гидродинамические характеристики;
- 3) разработка варианта конструкции перемешивающего устройства и определение места ввода катализатора, позволяющего снизить налипание реакционной массы на теплообменные элементы.

Методы исследования. Поставленные задачи связаны с численным решением системы дифференциальных уравнений сохранения массы и импульса с использованием метода контрольного объема. Для замыкания этой системы использовалось семейство k-ε моделей турбулентности.

Достоверность подтверждается сравнением полученных в работе результатов по полю скорости, критериям мощности и подачи в аппаратах с быстросходными мешалками с экспериментальными данными, известными в научной и справочной литературе, а также сравнением результатов с данными промышленных испытаний.

Научная новизна:

- 1) Определены модели турбулентности и их параметры, обеспечивающие адекватное описание поля скорости в аппаратах с шестилопастной открытой турбинной мешалкой и шестилопастной мешалкой с наклонными под углом 45° лопатками.
- 2) Определена автомодельная область для полей приведенных составляющих скорости по отношению к центростремительному критерию Рейнольдса Re_u для разных отношений диаметра мешалки к диаметру аппарата d_u/D_u .
- 3) Предложено аналитическое выражение для определения критерия мощности в аппаратах с двухъярусными открытыми турбинными мешалками в зависимости от расстояния между мешалками и их диаметра.
- 4) Определены зависимости влияния взаимного расположения мешалок на валу на поле скорости и величину скорости диссипации кинетической энергии.

Практическая значимость.

1. Разработанная методика позволяет рассчитывать гидродинамические характеристики в аппаратах с быстроходными мешалками в зависимости от конструкции и размеров перемешивающих устройств.

2. На основе разработанной методики предложен вариант изменения конструкции шестиярусной мешалки в реакторе-полимеризаторе получения БК на заводе «Бутилкаучук» ОАО «Нижнекамскнефтехим», заключающийся в изменении угла наклона лопастей второй мешалки на 10° , который позволил:

- увеличить время движения крошки полимера до теплообменных элементов, что в свою очередь приводит к увеличению доли полимера, охлажденного ниже температуры стеклования;
- сократить величину теплообменного сопротивления при перемешивании на 16%;

Научная библиотека
им. Н. И. Лобачевского

- для выбора места ввода катализаторного раствора определить область с высоким значением скорости диссипации кинетической энергии, что в свою очередь привело к уменьшению диаметра наибольших капель на 10%, и соответственно, увеличению поверхности теплообмена на 10,4%;

В результате изменения гидродинамической обстановки в месте ввода катализатора, привели к частичному уменьшению налипания полимеризационной среды на перемешивающее и внутренние теплообменные устройства и увеличили время пробега реактора.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Методика расчета аппаратов с перемешивающими устройствами с использованием комплекса вычислительной гидродинамики.
2. Влияние конструкции перемешивающего устройства на гидродинамику в аппаратах с многоярусными мешалками.
3. На основе численного эксперимента решена прикладная задача: вариант реконструкции шестиярусной мешалки в реакторе-полимеризаторе синтеза бутилкаучука.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики, математики, информатики» (г. Пермь, 2010), также ежегодных научных сессиях Казанского государственного технологического университета, 2008 - 2011 гг.

Публикации работы. Основное содержание работы отражено в 5 опубликованных печатных трудах, в том числе 4 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы из 82 наименований, а также 1 приложения. Работа изложена на 111 страницах машинописного текста, включающего 7 таблиц, 42 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, заключающаяся в необходимости разработки методик расчета аппаратов с перемешивающими устройствами, широко используемых в различных отраслях промышленности, сформулирована новизна работы, определена цель исследования, отражены методы исследования, практическая значимость полученных результатов и основные положения диссертации, выносимые на защиту, также кратко излагается содержание диссертации по главам.

Первая глава посвящена обзору работ по экспериментальным, полуэмпирическим и численным методам исследования гидродинамики в аппаратах с мешалками. Измерения локальных скоростей потоков в экспериментальной гидродинамике успешно выполнялись оптическими методами, однако эти методы сложны и не являются удовлетворительными в плане практических приложений. Сложность и стоимость измерительной системы весьма значительны, также эти методы требуют сложной обработки результатов. Полное описание поля скоростей в форме эмпирических зависимостей не получено из-за сложно-

сти картины течения, но существует качественное описание характера распределения скоростей на основе упрощенных моделей, в которых заложено постоянство составляющих скорости по высоте аппарата, что в большинстве случаев является грубым приближением. Таким образом, полуэмпирические методики позволяют определять некоторые средние величины компонентов скорости. Однако для моделирования определяющее значение имеют локальные характеристики течения. В настоящее время, в связи с бурным развитием численных методов и увеличением мощности ЭВМ, существует возможность численного решения дифференциальных уравнений для получения поля скорости, давления в трехмерной постановке с использованием комплексов вычислительной гидродинамики. Численное моделирование вращательного движения лопастей мешалки относительно неподвижных внутренних устройств аппарата является сложным в вычислительном отношении. Много лет это было самой большой проблемой при моделировании аппаратов с мешалками, что привело к развитию обширного числа приближенных численных методик в обработке поля скорости в этих аппаратах. Наиболее рациональным видится метод множественной системы отсчета (МСО), так как может быть расширен на перемешивающие устройства различной формы, на аппараты с многоярусными мешалками, при моделировании многофазных потоков без чрезмерных требований к вычислительным ресурсам, и что имеет особое значение - он доступен во многих комплексах вычислительной гидродинамики.

Во второй главе представлена методика расчета поля скорости в аппаратах с перемешивающими устройствами, заключающаяся в численном решении системы дифференциальных уравнений сохранения массы и импульса с частными производными в цилиндрических координатах в трехмерной постановке методом контрольного объема (схема segregated):

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rU\phi) + \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(V\phi) + \rho \frac{\partial}{\partial z}(W\phi) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_r r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_\theta \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_\phi \end{aligned} \quad (1)$$

уравнение	0	Γ_ϕ	S_ϕ
неразрывности	1	0	0
движения	U	$\mu_r + \mu_\theta$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_r r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_\theta r \frac{\partial (V/r)}{\partial \theta} \right) +$ $+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_z \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{2\Gamma_\phi}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} - \frac{2\Gamma_\theta}{r^2} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\rho V^2}{r}$

	V	$\mu_{\kappa} + \mu_t$	$-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\Gamma_{\phi}}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\Gamma_{\phi}}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} \right) +$ $+ \Gamma_{\phi} \frac{\partial (V/r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Gamma_{\phi} V) - \frac{\rho UV}{r} + \frac{\Gamma_{\phi}}{r^2} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{2 \Gamma_{\phi} U}{r} \right)$
	W	$\mu_{\kappa} + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_{\phi} r \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial W}{\partial z} \right)$

Для замыкания системы уравнений (1) использовались k-ε модели турбулентности: стандартная, RNG и realizable модификации, у которых есть настраиваемые параметры $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_{μ} , σ_k , σ_{ϵ} .

В аппаратах с быстроходными мешалками можно выделить две характерные области: это область, примыкающая к мешалке, которая характеризуется большим градиентом скорости и остальная область вплоть до стенок аппарата. Исследованы необходимые требования к расчетным сеткам и размеру ячеек: для сходимости решения необходимо, чтобы шаг сетки в области, примыкающей к мешалке, был ≤ 3 мм, а вне ее - ≤ 8 мм. При задании граничных условий использовался метод множественной системы отсчета, в котором поле скорости вокруг мешалки рассчитывается во вращающейся со скоростью мешалки системе отсчета, а вне ее - в неподвижной, в которой стенка и внутренние устройства неподвижны. На границе соприкосновения областей используется условие проницаемости для всех характеристик потока. Показана возможность сокращения расчетной области, основанная на использовании свойств симметрии и периодичности. Оценка точности решения проверялась из условия равновесия моментов, выраженного в форме равенства крутящего момента, приложенного к жидкости при движении лопастей мешалки, и момента сопротивления корпуса аппарата и неподвижных внутренних устройств, а также постоянства значений локальных составляющих скорости в некоторой точке вблизи лопасти мешалки и момента на лопасти мешалки.

Адекватность описания поля скорости проверялась для аппаратов с двумя типами перемешивающих устройств: 1 - шестилопастная мешалка с наклонными под углом 45° лопатками; 2 - шестилопастная стандартная открытая турбинная мешалка, т.к. для них известны количественных экспериментальные данные в виде профилей составляющих скорости (осевой, радиальной и тангенциальной), критериев мощности и подачи. Кроме того, подобные мешалки используются в реакторе-полимеризаторе БК.

Установлено, что для рассчитанного поля скорости в аппаратах с мешалками 1-го типа наилучшее совпадение с экспериментальными данными получено при использовании realizable k-ε модели турбулентности с измененным от стандартного значения ($C_{2\epsilon}^{std} = 1,9$) параметром $C_{2\epsilon} = 2,3$ (рис.1).

В случае моделирования аппаратов с мешалками 2-го типа все семейство k-ε моделей турбулентности даст близкие результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными, что видно из рис.2. Исходя из меньшей трудо-

емкости расчета, рекомендуется использовать стандартную k-ε модель турбулентности.

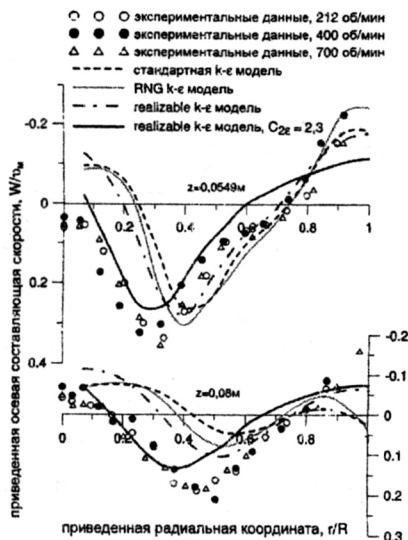


Рис. 1. Радиальный профиль приведенной осевой скорости W/u_m в сечениях на высотах, равных 0,0549м и 0,08м для аппарата с шестилопастной мешалкой с лопатками, наклоненными под углом 45°

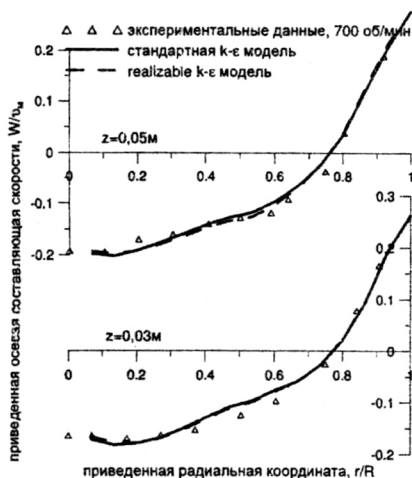


Рис. 2. Радиальный профиль приведенной осевой скорости W/u_m в сечениях на высотах, равных 0,05м и 0,03м для аппарата с шестилопастной стандартной открытой турбинной мешалкой

По результатам расчета поля скорости было выявлено, что для аппаратов со стандартной открытой турбинной мешалкой с симплексом $D_a/d_m = 3 \div 7$ приведенные профили составляющих скорости (отнесенные к максимальной скорости на концах лопасти мешалки) становятся неизменными при выполнении условия $Re_n \geq 200000(d_m/D_a)^{1,28}$. На рис.3 приведенные профили составляющих скорости, откуда видно наступление автомодельной области по отношению к числу Re_n .

Критерий мощности K_N определялся по следующим выражениям:

$$K_N^{кр} = \frac{2\pi M_{кр}}{\rho N^2 d_m^5}, \quad (2)$$

$$K_N^{корп} = \frac{2\pi M_{корп}}{\rho N^2 d_m^5}, \quad (3)$$

$$K_N^e = \frac{\int_{V_a} \epsilon dV_a}{N^3 d_m^5}. \quad (4)$$

В результате расчетов с использованием выражений (2) и (3) были получены данные, хорошо согласующиеся с экспериментом (ошибка менее 6%), что видно из рис.4. Однако при использовании выражения (4) в автомодельной области получаются заниженные результаты (до 25%).

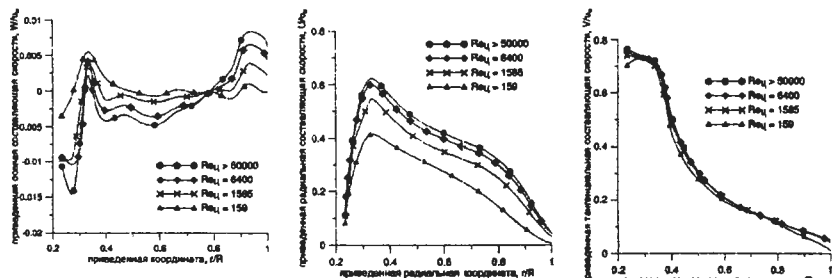


Рис.3. Автомодельность составляющих скорости для шестилопастной стандартной открытой турбинной мешалки $d_m = D_s/3$

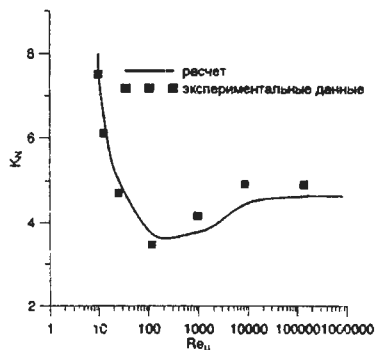


Рис. 4. Критерий мощности для аппарата со стандартной открытой турбинной мешалкой ($d_m = D_s/3$) и четырьмя отражательными перегородками

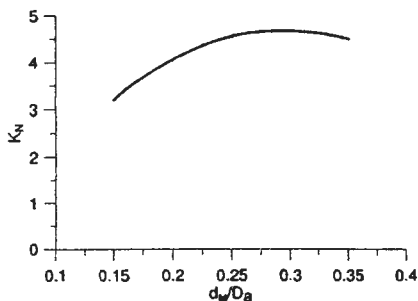


Рис. 5. Зависимость критерия мощности K_N от симплекса d_m/D_s для аппаратов с четырьмя перегородками и одной стандартной открытой турбинной мешалкой на валу

Значения критерия мощности для аппаратов с одной стандартной открытой турбинной мешалкой на валу и четырьмя отражательными перегородками, известные в литературе, ограничены областью $0,25 \leq d_m/D_s \leq 0,35$, однако на практике находят применение и аппараты с $0,15 \leq d_m/D_s \leq 0,25$, для которых и были получены критерии мощности, представленные на рис.5, из которого видно, что уменьшение диаметра мешалки вдвое приводит к уменьшению критерия мощности в 1,5 раза.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования для аппаратов с двухъярусными открытыми турбинными мешалками. Структура потоков в них сильно зависит от таких геометрических симплексов, как d_m/D_s , C_{1-2}/d_m , C_{D-1}/D_s , C_{D-k}/d_m , изменение которых приводит к абсолютно разным

полям скорости, что в свою очередь влияет на гидродинамические характеристики.

Были исследованы семь цилиндрических аппаратов с четырьмя равномерно расположенными отражательными перегородками, простирающимися от крышки до дна аппарата, снабженные двумя стандартными открытыми турбинными мешалками на одном валу. Рассматривались возможные варианты изменения конструкции перемешивающего устройства, которые могли бы быть сделаны в реакторе-полимеризаторе БК. В этой связи варьировались диаметр мешалки от $(0,15 \div 0,35)D_d$ и расстояния между мешалками от $(1 \div 2,5)d_m$ с целью анализа поведения критерия мощности, локальных скоростей и скорости диссипации кинетической энергии. Расстояние от дна аппарата до нижней кромки лопасти мешалки во всех случаях было равным диаметру мешалки.

На рис.6 приведены распределение скоростей в трех из рассматриваемых аппаратах с мешалкой диаметром, равным $d_m = 0,264D_d$ и расстояниями между мешалками $(1 \div 2,5)d_m$. При $C_{1-2} = d_m$ организована так называемая объединенная структура потока, а при $C_{1-2} = 2,5d_m$ - параллельная структура потока. При расстоянии между мешалками большем диаметра мешалок взаимодействие между потоками от верхней и нижней мешалок ослабевает, и приводит к разделению объема аппарата на две равные симметричные части по высоте. Также можно заключить, что с увеличением расстояния между мешалками образуется больше циркуляционных контуров.

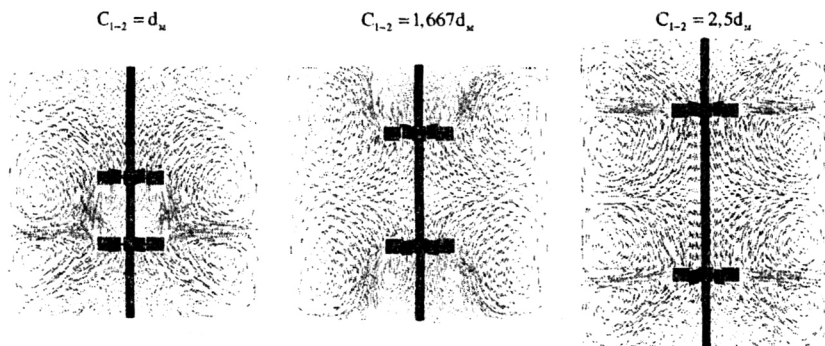


Рис.6. Распределение скоростей в аппаратах с двухъярусными открытыми турбинными мешалками

Критерий мощности для аппаратов с двухъярусными стандартными открытыми турбинными мешалками от симплекса C_{1-2}/d_m имеет вид симметричной функции с S-образной формой, что показано на рис.7. Для удобства использования результатов расчетов предлагается соотношение, связывающие критерий мощности с диаметром мешалки и расстоянием между мешалками, которое было получено аппроксимацией данных численного эксперимента, в виде (5):

$$K_N = 1,45K_{N1} + 0,45K_{N2} \cdot \operatorname{th} \left(\frac{C_{1-2}/d_m - 1,47d_m/D_d - 0,66}{0,5} \right). \quad (5)$$

со следующими ограничениями:

$$C_{D-1} \geq d_m; H \geq D_s; C_{1-2} \leq 2,5d_m; d_m = (0,15 \div 0,35)D_s.$$

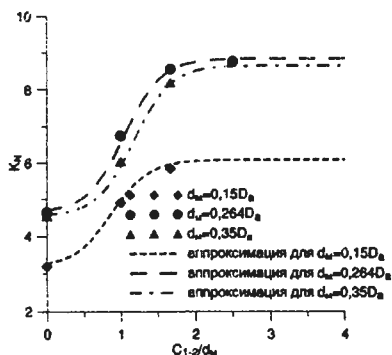


Рис.7. Кривая критерия мощности для аппаратов с двухъярусными стандартными открытыми турбинными мешалками от симплекса C_{1-2}/d_m

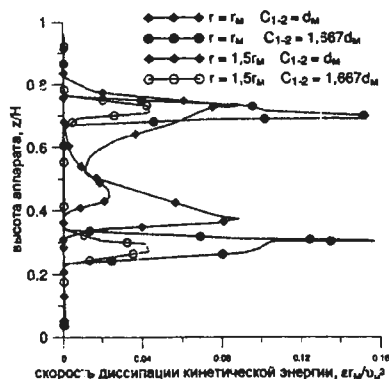


Рис.8. Приведенная скорость диссипации кинетической энергии, осредненная по углу, по высоте на расстоянии равно r_m и $1,5r_m$ для двух аппаратов с двухъярусными мешалками диаметром $d_m = 0,35D_s$ ($D_s = 0,289\text{m}$) и расстояниями между ними $C_{1-2} = d_m$ и $C_{1-2} = 1,667d_m$

Максимальное значение скорости диссипации кинетической энергии определяет интенсивность смешения жидких потоков на микроуровне, что обеспечивает возникновение мелкомасштабных сдвиговых деформаций и, как следствие, получение тонкодисперсных эмульсий и суспензий. Проведенный анализ распределения скорости диссипации кинетической энергии в семи рассматриваемых аппаратах позволил заключить, что увеличение расстояния между мешалками приводит к увеличению скорости диссипации кинетической энергии (рис.8), и при $C_{1-2} = 1,7d_m$ достигается ее предельное значение, соответствующее одной мешалке на валу.

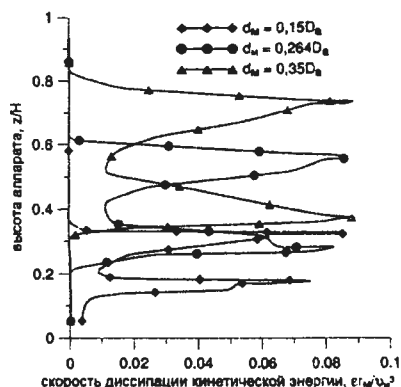


Рис.9. Приведенная скорость диссипации кинетической энергии, осредненная по углу, по высоте на расстоянии равно r_m для трех аппаратов с двухъярусными мешалками диаметром $d_m = (0,15 \div 0,35)D_s$ ($D_s = 0,289\text{m}$) и расстояниями между ними $C_{1-2} = d_m$

Здесь также необходимо учесть тот факт, что увеличения скорости диссипации можно достичь и при малых диаметрах мешалки, что видно из рис.9. Однако необходимо помнить, что увеличение C_{1-2} приводит к образованию не взаимодействующих потоков, что влечет к появлению застойных зон, таким образом, эти эффекты надо рассматривать в комплексе.

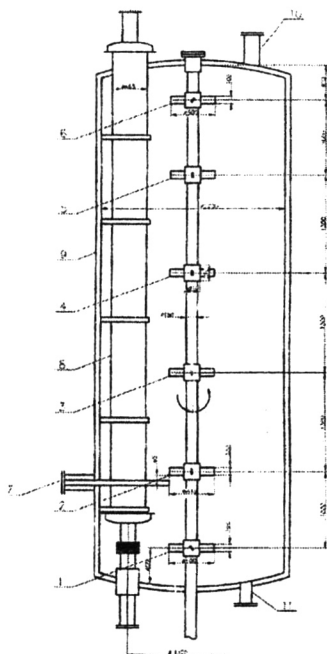
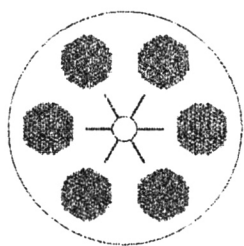


Рис.10. Реактор синтеза бутилкаучука: 1, 6 – лопастные мешалки с наклонными лопатками; 2, 3, 4, 5 – лопастные мешалки с прямыми лопатками; 7 – патрубок для ввода каталитического раствора; 8 – пучки теплообменных труб; 9 – корпус полимеризатора; 10 – патрубок для выхода продукта; 11 – патрубок для ввода шихты

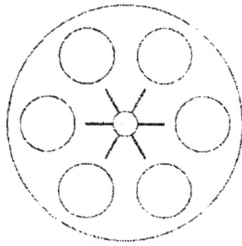
В четвертой главе на основе разработанной методики расчета поля скорости и исследованных закономерностей гидродинамических характеристик в аппаратах с многоярусными мешалками рассмотрена задача уменьшения налипания полимера в реакторе-полимеризаторе синтеза бутилкаучука. Реактор для проведения синтеза бутилкаучука, представлен на рис.10. В заводских условиях используются лопастные мешалки, 1 и 6 мешалки имеют наклонные лопасти под углом 45° , катализатор вводится под 2 мешалку, расстояние между мешалками 2, 3, 4, 5 равномерное. Для съема выделившегося тепла реактор снабжен шестью пучками теплообменных труб, равномерно расположенными по окружности диаметром 1,32 м.

В модели реактора-полимеризатора вместо пучка теплообменных труб (рис.11а) использовалась одна труба (рис.11б), возможность этой замены подтверждена двумерными расчетами, результаты которых представлены на рис.12. Так как содержание полимера в объеме реактора не превышает 12% и плотность полимера близка к плотности растворителя (хлорметила), среда рассматривалась как однофазная, физико-химические свойства которой рассчитывались исходя из соотношений для суспензии.

Рассчитанная мощность, затрачиваемая на



а – модель с пучком труб (206 труб)



б – модель с цилиндрической трубой

Рис. 11. Модели аппаратов для двумерной постановки задачи

перемешивание, находится в хорошем согласовании с данными по мощности, взятыми из рабочих листов промышленного процесса получения бутилкаучука, расхождение составило 3%. В результате проведенных расчетов было также выявлено, что, для реактора-полимеризатора

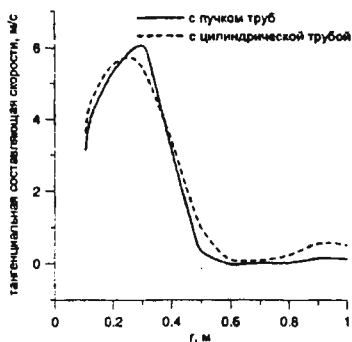


Рис. 12. Профиль тангенциальной составляющей скорости в двумерной задаче для моделей с пучком труб и одной большой цилиндрической трубой

автомодельная область для приведенных величин составляющих скорости по отношению к числу Re_d наступает, как и в случае одной мешалки на валу.

Так как основной причиной налипания полимера является соударение части незастеклованного полимера с теплообменными трубами, то уменьшить количество налипаний в единицу времени можно, если создать условия, при которых увеличится доля полимера охлажденного до температуры ниже температуры стеклования. К понижению температуры полимерной крошки приведет увеличение времени движения образовавшего полимера до встречи

с теплообменными трубами, а также уменьшение размера полимерных частиц. Этого можно достичь изменением конструкции перемешивающего устройства, которое приведет к изменению структуры потока и образованию области с высоким значением скорости диссипации кинетической энергии в месте ввода катализаторного раствора.

С целью изменения структуры потока в реакторе-полимеризаторе были рассмотрены различные варианты изменения перемешивающего устройства, а именно изменения расстояний между мешалками и угла наклона лопастей. Анализ структуры потоков, критерия мощности и скорости диссипации кинетической энергии позволил подобрать вариант, который дает возможность улучшения технологических параметров процесса, изменив угол наклона лопастей 2 и 5 мешалок на 10° и сближения 3 и 4 мешалок, и смещения места ввода катализатора над 2 мешалку.

Для промышленного и предложенного вариантов была произведена оценка охлаждения крошки полимера, которая рассматривалась как сферическая частица. Если принять, что частица движется вместе с потоком, т.е. скорость обтекания равна нулю, то тогда получим предельный случай $Nu = 2$. По значению критериев Био и Фурье было определено распределение температуры поверхности частиц во времени, представленные на рис. 11, т.к. крошка полимера имеет разные размеры, здесь представлены две кривые времени охлаждения наименьшей и наибольшей частиц.

Для промышленного варианта в месте ввода катализатора сильно развит радиальный поток, по сравнению с осевым, поэтому время движения крошки полимера от места ввода катализатора до теплообменных труб было определено с учетом радиальной составляющей скорости, которое составило одну десятую секунды, что говорит о том, что основная масса образовавшегося полимера, не успев охладиться, будет налипать на теплообменные трубы. Для предложенного варианта была произведена оценка времени движения частиц с учетом радиальной и осевой составляющих скорости, т.к. в области 2 мешалки сильно развит осевой поток. Средние по поперечному сечению на участке от конца лопа-

сти мешалки до теплообменника осевая и радиальная составляющие скорости между 2 и 3 мешалками в этом варианте представлены на рис.14. По ним была определена траектории движения частиц (рис.15), видно, что частица достигает

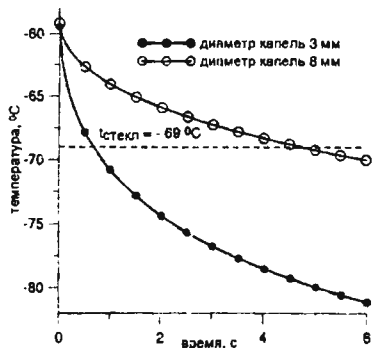


Рис.13. Распределение температуры поверхности сферической частицы во времени

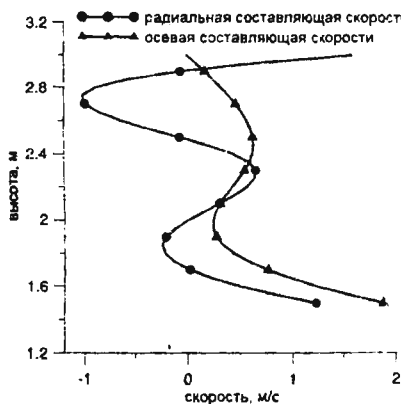


Рис.14. Средние по поперечному сечению на участке от конца лопасти мешалки до теплообменника осевая и радиальная составляющие скорости между 2 и 3 мешалками в варианте 7

теплообменные трубы на высоте 2,215 м, за время 1,7 с (рис.16). Т.о., в этом варианте успеют охладиться капли диаметром до 5 мм. Кроме того, предлагаемый

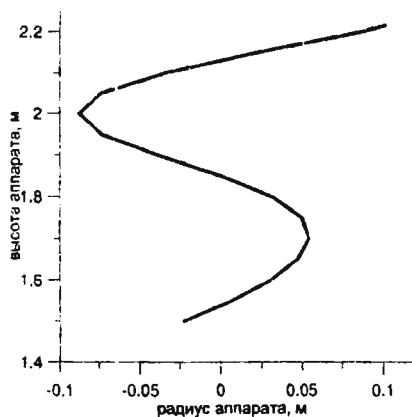


Рис.15. Траектория движения частиц от места ввода катализатора до теплообменных труб в варианте 7

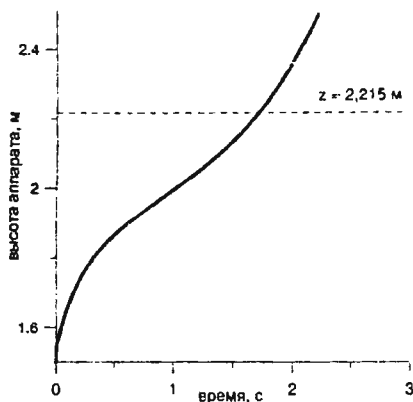


Рис.16. Время движения частиц по высоте аппарата в варианте 7

вариант дает сокращение мощности, затрачиваемой на перемешивание, на 16 %, по сравнению с промышленным вариантом, а также увеличение диссипации кинетической энергии в месте ввода катализатора на 50 %, что в свою очередь приводит к уменьшению диаметра капель на 15%.

Эффективность результатов работы подтверждается «Актом о промышленном использовании результатов моделирования», приведенным в приложении диссертации.

В заключении сформулированы основные выводы работы. Диссертация заканчивается списком использованных источников и приложением.

Основные результаты и выводы:

1. Определены модели турбулентности и их параметры, обеспечивающие адекватное описание поля скорости в аппаратах с быстроходными мешалками следующих типов: шестилопастной мешалкой с лопатками, наклоненными под углом 45° предлагается использовать realizable k-ε модель турбулентности с измененным от стандартного значения параметром $C_{2\varepsilon} = 2,3$; шестилопастной стандартной открытой турбинной мешалкой - стандартную k-ε модель турбулентности.
2. Определена автомодельная область приведенных составляющих скорости по отношению к числу Re_d для аппаратов со стандартной (одно- и многоярусной) открытой турбинной мешалкой с симплексом $D_s/d_m = 3 \div 7$, которая наступает при выполнении условия $Re_d \geq 200000(d_m/D_s)^{1,28}$.
3. Показано, что изменение расстояний между мешалками и их диаметра, приводит к существенному изменению поля скорости и величины скорости диссипации кинетической энергии, что позволяет влиять на размер дисперсной фазы.
4. Предложено соотношение для определения критерия мощности для аппаратов с двухъярусной стандартной открытой шестилопастной турбинной мешалкой и четырьмя отражательными перегородками, в зависимости от диаметра мешалок и расстояния между ними.
5. Предложено изменение конструкции перемешивающего устройства реактора-полимеризатора синтеза БК, заключающееся в изменении угла наклона лопастей 2 и 5 мешалок на 10° и сближения 3 и 4 мешалок, для увеличения времени его пробега.

Список условных обозначений: U , V , W - радиальная, тангенциальная и осевая составляющие скорости, соответственно, r , θ , z - координаты, μ_m , μ_t - динамический коэффициент молекулярной и турбулентной вязкости, соответственно, p - давление; ρ - плотность жидкости, D_s - диаметр аппарата, d_m - диаметр мешалки, N - частота вращения мешалки, $Re_d = \rho N d_m^2 / \mu$ - центробежный критерий Рейнольдса, M_{kr} - крутящий момент на лопастях мешалки, $M_{кор}$ - момент сопротивления корпуса аппарата, ϵ - скорость диссипации кинетической энергии, V_a - объем аппарата, $K_N = P / \rho N^3 d_m^5$ - критерий мощности, P - мощность, C_{a-1} , C_{a-x} -- расстояние от дна до нижней мешалки и от верхней мешалки до крышки, соответственно, в аппаратах с многоярусными мешалками, C_{i-j} - расстояние между i и j мешалками в аппарате с многоярусными мешалками, $Nu = \alpha \cdot d_m / \lambda_{cp}$ - критерий Нуссельта, α - коэффициент теплоотдачи от

1/2
крошки полимера к среде, d_p - диаметр частицы (крошки) полимера, λ_{cp} - коэффициент теплопроводности среды.

Основные результаты работы представлены в следующих публикациях:

1. Минибаева, Л.Р. Численное моделирование гидродинамической структуры потока в аппарате с перемешивающими устройствами / Л.Р. Минибаева, А.Г. Мухаметзянова, А.В. Клинов // Вестник Казанского технологического университета. - 2008. - №6. - Ч.1. - С.191 - 198.

2. Клинов, А.В. Расчет гидродинамики в реакторе-полимеризаторе для синтеза бутилкаучука / А.В. Клинов, А.Г. Мухаметзянова, А.В. Малыгин, Л.Р. Минибаева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2009. - №12. - С.3 - 6.

Klinov, A.V. Analysis of the hydrodynamics in a polymerizing reactor for the synthesis of butyl rubber / A.V. Klinov, A.G. Mukhametzyanova, A.V. Malygin, L.R. Minibaeva // Chemical and Petroleum Engineering. - New York. - 2009. - Vol.45. - № 11-12. - P.735 - 740.

3. Минибаева, Л.Р. Модели турбулентности для адекватного описания поля скорости в аппаратах с перемешивающими устройствами / Л.Р. Минибаева, А.Г. Мухаметзянова, А.В. Клинов // Вестник Казанского технологического университета. - 2010. - №9. - С.469 - 477.

4. Минибаева, Л.Р. О влиянии конструкции перемешивающего устройства на характеристики потока в аппаратах с многоярусными мешалками / Л.Р. Минибаева, А.Г. Мухаметзянова, А.В. Клинов // Вестник Казанского технологического университета. - 2010. - №11. - С.201 - 210.

5. Минибаева, Л.Р. Модели турбулентности для расчета аппаратов с перемешивающими устройствами на основе вычислительной гидродинамики / Л.Р. Минибаева, А.Г. Мухаметзянова, А.В. Клинов // Материалы докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы механики, математики, информатики». - Пермь, 2010. - С.146.

Соискатель



Л.Р. Минибаева

Заказ № 157

Тираж 100 экз.

Офсетная лаборатория КГТУ 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д.68